

PROJECT ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΎ **ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΘΕΩΡΙΑΣ** **ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ**

Όνομα: Μάριος Νεκτάριος Σταματόπουλος

A.M. : 1059383

«ΣΎΣΤΗΜΑ MOTION CAPTURE ΜΕ ΤΗΝ
ΧΡΉΣΗ ARUCO MARKERS ΚΑΙ ΦΙΛΤΡΟΥ
KALMAN»

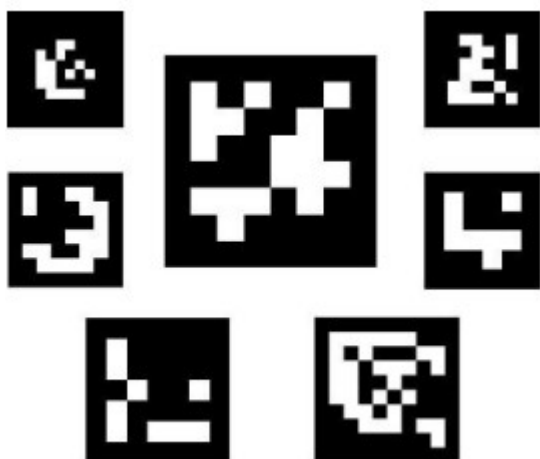
[Κώδικας στο Github](#)

Εισαγωγή

Στο πλαίσιο εκπόνηση της διπλωματικής “**Collaborative control of aerial robots (drones) for co-manipulating flexible objects (ropes)**” υπάρχει η ανάγκη να είναι γνωστή η απόλυτη θέση του drone στον χώρο ώστε να γίνει σωστός έλεγχος του και αποφυγή εμποδίων. Η συνηθέστερη τακτική που ακολουθείται είναι το σύστημα GPS όταν βρίσκεται σε εξωτερικό χώρο και αυτή του motion capture συστήματος σε εσωτερικούς χώρους. Η οποία χρησιμοποιεί έναν αριθμό υπέρυθρων καμερών όπου αυτές εντοπίζουν ανακλαστικούς δείκτες (reflective markers) στον χώρο και μέσω αλγορίθμων τριγωνοποίησης δίνουν την θέση και το προσανατολισμού του αντικειμένου προς μελέτη στον χώρο. Επειδή κοστίζουν δεκάδες χιλιάδες ευρώ, προτείνεται μια φθηνότερη εναλλακτική υπολογιστικής όρασης. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται αυτή των fiducial markers και συγκεκριμένα των aruco markers οι οποίοι τοποθετούνται πάνω στο drone και μέσω μιας webcam εντοπίζονται στην εικόνα.

Aruco Markers

Οι Aruco markers [3], [4] αποτελούν ένα είδος fiducial markers και χρησιμοποιούνται εκτενώς σε ρομποτικές εφαρμογές σχετικές με ανίχνευση και προσανατολισμό στον χώρο.



Το μεγαλύτερο τους πλεονέκτημα είναι ότι μόνο ένα marker παρέχει αρκετές αντιστοιχίες (οι 4 γωνίες του) για να γίνει Pose recognition και η εσωτερική του δυαδική κωδικοποίηση τους καθιστά αξιόπιστα και δύσκολα επηρεαζόμενα από θόρυβο. Οπότε για να γίνει η

ανίχνευση μετατρέπεται όλη εικόνα σε ασπρόμαυρη, ανιχνεύονται τα 2D σημεία των ακμών του marker και γνωρίζοντας τις παραμέτρους του φακού και το μήκος της πλευράς του marker εξάγεται το διάνυσμα της θέσης και της περιστροφής του σε σχέση με την κάμερα. Έπειτα το διάνυσμα της περιστροφής του μετατρέπεται σε πίνακα περιστροφής μέσω της μεθόδου Rodrigues και έπειτα από αυτό υπολογίζονται οι γωνίες roll,pitch,yaw (Euler Angles).

Calibration κάμερας

Για να γίνει η εκτίμηση της θέσης χρειάζεται ένα calibration στην κάμερα ώστε να ανιχνευθούν και να εξαλειφθούν οι παραμορφώσεις που προκαλούνται λόγω του φακού.

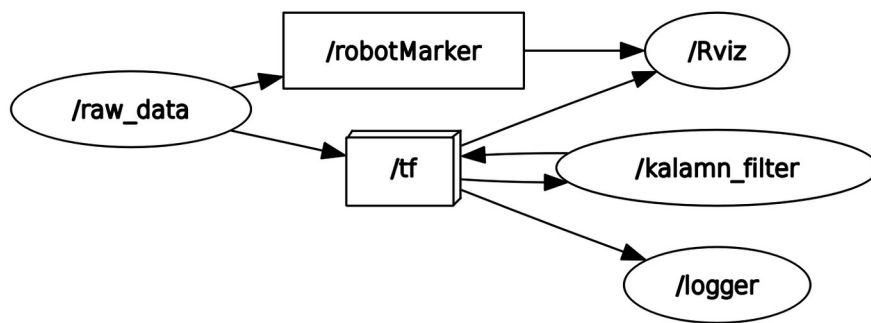


Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας μια σκακιέρα η οποία βοηθάει στο να εξαχθούν εύκολα και γρήγορα πολλά σημεία ενδιαφέροντος που θα βοηθήσουν στον καθορισμό των παραμέτρων του φακού (focal length, κέντρο φακού και την λοξότητα στον κάθε άξονα). Έτσι συλλέγονται διάφορες φωτογραφίες της σκακιέρας έχοντας διάφορες θέσεις και προσανατολισμό και ανιχνεύονται οι γωνίες της κάθε μιας, βρίσκονται οι 2D συντεταγμένες και γίνεται το τελικό calibration.

Περιβάλλον ανάπτυξης

Ολόκληρο το σύστημα έχει αναπτυχθεί με την βοήθεια του περιβάλλοντος ROS (Robot Operating System) [1] το οποίο δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να χωρίσει τον κώδικα του σε μικρότερα κομμάτια ονομαζόμενα Nodes(κόμβοι) και αναλαμβάνει την επικοινωνία μεταξύ τους. Επίσης διαθέτει διάφορα εργαλεία και

βιβλιοθήκες για μαθηματικές μετατροπές ,απεικονίσεις κ.α. σχετικά με ρομποτική που επιταχύνουν την διαδικασία ανάπτυξης. Παρακάτω φαίνεται η βασική δομή του συστήματος στην οποία όσα είναι σε κύκλο είναι κόμβοι οι οποίοι είτε στέλνουν ή δέχονται (ανάλογα με την φορά του βέλους) τα μηνύματα που είναι μέσα στα τετράγωνα.



Τα κύρια nodes είναι:

1. **raw_data** --> επικοινωνεί με την κάμερα, παίρνει το βίντεο από αυτή και τρέχει τους αλγόριθμους computer vision ώστε να πάρει την μέτρηση της θέσης σε x,y,z για το drone
2. **Kalman_filter** --> λαμβάνει τις μετρήσεις από το raw_data και βγάζει έξοδο μια νέα εκτίμηση για την θέση του drone.
3. **Logger** --> Καταγράφει όλα τα δεδομένα που υπάρχουν στο σύστημα ώστε να γίνει απεικόνιση τους μετά σε γραφήματα.
4. **Rviz** --> 3D απεικόνιση του drone στον χώρο σε πραγματικό χρόνο

Φίλτρο Kalman

Για το φίλτρο Kalman και την παρακολούθηση των drone χρησιμοποιήθηκαν 3 γραμμικά μοντέλα τα οποία επιτελούν τον ίδιο σκοπό αλλά θεωρούν διαφορετικούς παραγώγους της θέσης σταθερές και τις υπόλοιπες ως θόρυβο:

- Σταθερής ταχύτητας
- Σταθερής επιτάχυνσης
- Σταθερού jerk (παράγωγος επιτάχυνσης)

Για τα 3 μοντέλα χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος πίνακας μετρήσεων

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

αφού οι μετρήσεις είναι μόνο θέσης δηλαδή είναι οι 3 πρώτες καταστάσεις του συστήματος. Ο παραπάνω πίνακας έχει πάντα 3 γραμμές αλλά προστίθενται στήλες με μηδενικά ανάλογα με το μοντέλο.

Επίσης και για τα 3 μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν ο διαγώνιος μοναδιαίος πίνακας για την αρχική τιμή του πίνακα συμμεταβλητότητας (covariance matrix) και ο διαγώνιος μοναδιαίος πίνακας επί μαι σταθερή τιμή για τον θόρυβο της

$$\text{μέτρησης, δηλαδή } R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & 1 & . & . & . & 0 \\ 0 & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & 0 & . & . & . & 1 \end{bmatrix} * \sigma_R.$$

Σταθερής ταχύτητας

Χρησιμοποιήθηκαν οι πίνακες :

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & dt & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & dt \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Για τον πίνακα συμμεταβλητότητας του θορύβου του μοντέλου σε 1 διάσταση ισχύει το εξής :

$$Q = \begin{bmatrix} V(x) & COV(x, v) \\ COV(v, x) & V(v) \end{bmatrix}$$

για τα οποία ισχύουν

$$V(v) = \sigma_v^2 = E(v^2) - \mu_v^2 = E((a\Delta t)^2) - (\mu_a \Delta t)^2 = \Delta t^2 (E(a^2) - \mu_a^2) = \Delta t^2 \sigma_a^2$$

$$V(x) = \sigma_x^2 = E(x^2) - \mu_x^2 = E\left(\left(\frac{1}{2}a\Delta t^2\right)^2\right) - \left(\frac{1}{2}\mu_a\Delta t^2\right)^2 = \frac{\Delta t^4}{4}(E(a^2) - \mu_a^2) = \frac{\Delta t^4}{4}\sigma_a^2$$

$$COV(x, v) = COV(v, x) = E(xv) - \mu_x\mu_v = E\left(\frac{1}{2}a\Delta t^2 a\Delta t\right) - \left(\frac{1}{2}\mu_a\Delta t^2 \mu_a\Delta t\right) = \frac{\Delta t^3}{2}(E(a^2) - \mu_a^2) = \frac{\Delta t^3}{2}\sigma_a^2$$

άρα συνολικά ο πίνακας Q και στις 3 διαστάσεις είναι ο :

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{dt^4}{4} & 0 & 0 & \frac{dt^3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{dt^4}{4} & 0 & 0 & \frac{dt^3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{dt^4}{4} & 0 & 0 & \frac{dt^3}{2} \\ \frac{dt^3}{2} & 0 & 0 & dt^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{dt^3}{2} & 0 & 0 & dt^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{dt^3}{2} & 0 & 0 & dt^2 \end{bmatrix} * \sigma_Q$$

Σταθερής επιτάχυνσης

Χρησιμοποιήθηκαν οι πίνακες :

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 & \frac{dt^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 & \frac{dt^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 & \frac{dt^2}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & dt & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & dt \end{bmatrix}$$

Με παρόμοιο τρόπο με τον παραπάνω ο πίνακας Q και στις 3 διαστάσεις είναι ο :

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{dt^4}{4} & 0 & 0 & \frac{dt^3}{2} & 0 & 0 & dt^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{dt^4}{4} & 0 & 0 & \frac{dt^3}{2} & 0 & 0 & dt^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{dt^4}{4} & 0 & 0 & \frac{dt^3}{2} & 0 & 0 & dt^2 \\ \frac{dt^3}{2} & 0 & 0 & dt^2 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 \\ 0 & \frac{dt^3}{2} & 0 & 0 & dt^2 & 0 & 0 & dt & 0 \\ 0 & 0 & \frac{dt^3}{2} & 0 & 0 & dt^2 & 0 & 0 & dt \\ dt^2 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & dt^2 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & dt^2 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \sigma_Q$$

Σταθερό jerk

Χρησιμοποιήθηκαν οι πίνακες :

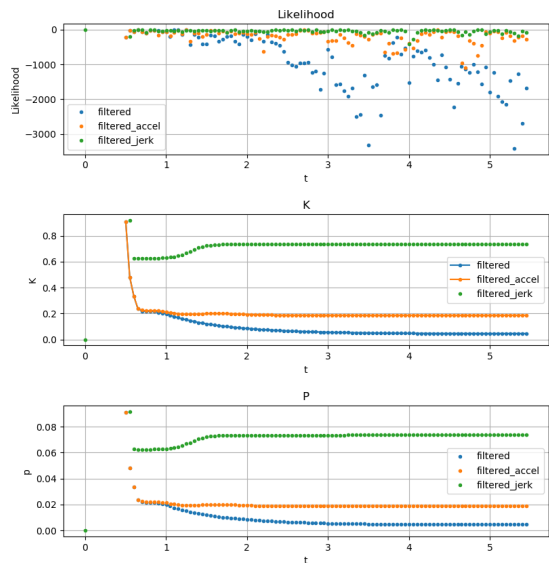
$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 & \frac{dt^2}{2} & 0 & 0 & \frac{dt^3}{6} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 & \frac{dt^2}{2} & 0 & 0 & \frac{dt^3}{6} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 & \frac{dt^2}{2} & 0 & 0 & \frac{dt^3}{6} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 & \frac{dt^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 & \frac{dt^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 & \frac{dt^2}{2} \end{bmatrix}$$

Για την εφαρμογή του φίλτρου Kalman δεν χρειάζεται να προστεθεί κάποιος θόρυβος αφού το σύστημα θέσης με τα Aruco ήδη έχει αλλά για να γίνουν πιο εμφανείς οι αλλαγές προστίθεται επιπλέον λευκός Gaussian θόρυβος .

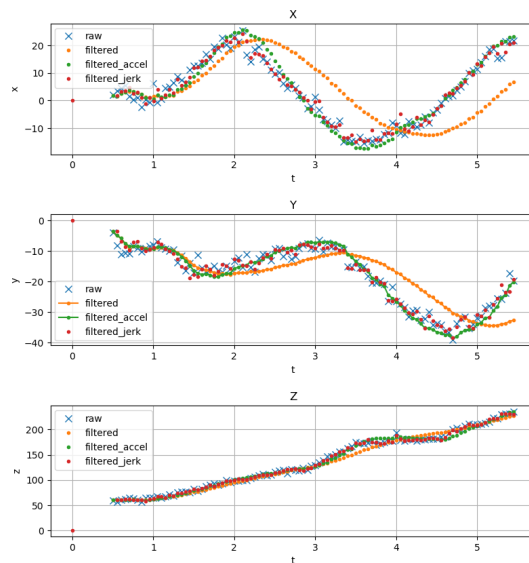
Αποτελέσματα

Για να είναι ακριβή τα αποτελέσματα και για να μπορεί να γίνει σύγκριση διαφόρων τιμών και των αποτελεσμάτων τους τα παρακάτω αποτελέσματα εξετάζονται πάνω στο ίδιο βίντεο. Ωστόσο το όλο σύστημα είναι σχεδιασμένο να δουλεύει και σε πραγματικό χρόνο.

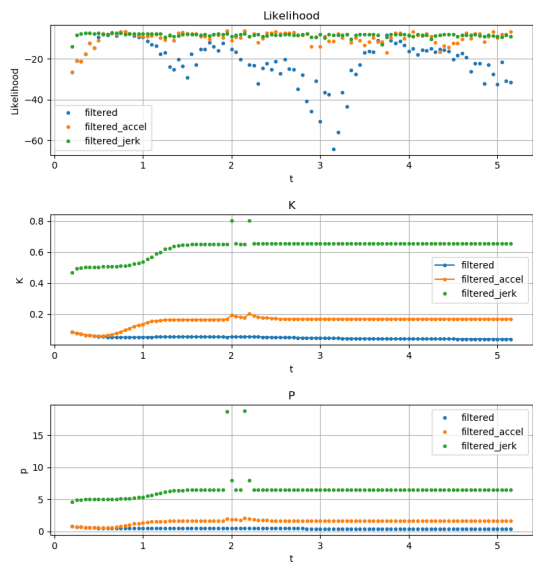
Measurement noise:0.1 Process noise:0.1



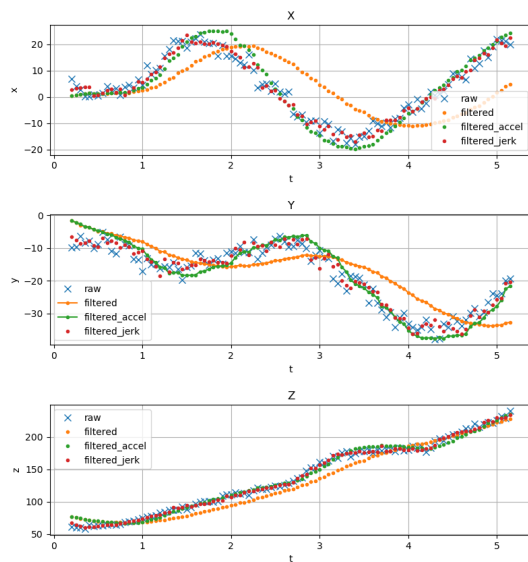
Measurement noise:0.1 Process noise:0.1



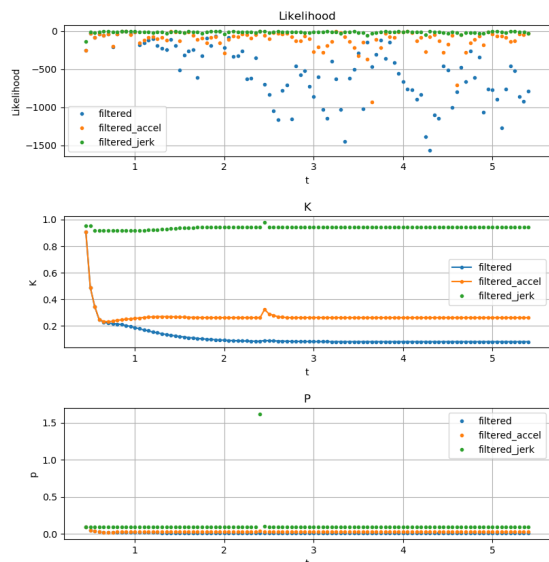
Measurement noise:5.0 Process noise:10.0



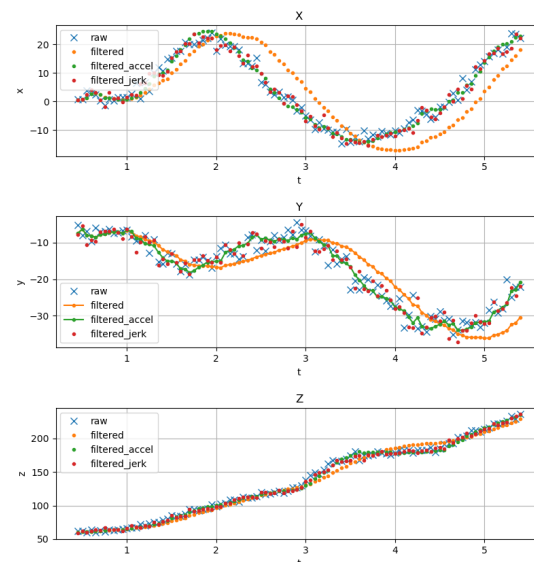
Measurement noise:5.0 Process noise:10.0



Measurement noise:1.0 Process noise:0.1



Measurement noise:1.0 Process noise:0.1



Στα αποτελέσματα φαίνονται δεξιά οι τιμές για τις 3 συντεταγμένες του drone στον χώρο για τα 3 διαφορετικά μοντέλα παρακολούθησης και τα μπλέ σημεία που σχηματίζουν Χ είναι οι δίχως επεξεργασία μετρήσεις. Αριστερά στην πρώτη γραμμή απεικονίζεται η πιθανότητα(likelihood) της κάθε εκτίμησης και απο κάτω εμφανίζονται τα πρώτα στοιχεία του πίνακα κέρδους K και του πίνακα συμμεταβλητότητας P. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι το μοντέλο σταθερής ταχύτητας δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα αφού παρουσιάζεται μια καθυστέρηση σε σχέση με τις μετρήσεις. Ωστόσο εμφανίζει μια από τις πιο ομαλές τροχιές. Οπότε η επιλογή θα γίνει μεταξύ αυτού της σταθερής επιτάχυνσης και σταθερού jerk. Έπειτα από δοκιμές επιλέγεται το μοντέλο της σταθερής επιτάχυνσης αφού παρόλο που σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζει μεγαλύτερα σφάλματα από το άλλο, αυτά τα σφάλματα είναι αποδεκτά για την χρήση που προορίζεται το σύστημα και μεγαλύτερη σημασία έχει να είναι ομαλή η διαδοχή των θέσεων ώστε να είναι και ομαλή η έξοδος των ελεγκτών που θα χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των τροχιών που θα δοθούν στο drone. Για τον ίδιο λόγο ο θόρυβος του μοντέλου επιλέγεται μικρότερος από αυτό των μετρήσεων ώστε να εμφανίζονται ομαλότερες μετρήσεις. Για να βρω ποια τιμή θορύβου θα χρησιμοποιηθεί στο τέλος βρίσκω την τυπική απόκλιση για κάθε συντεταγμένη κρατώντας το drone σταθερό. Βρίσκω 1.97, 2.05 και 1.8 οπότε επιλέγεται κοινό για όλα το 2. Τέλος έπειτα από δοκιμές ο θόρυβος του μοντέλου επιλέγεται το 0.7 και παρακάτω φαίνονται τα τελικά αποτελέσματα.

